جغرافیا و مخاطرات محیطی، شمارۀ سی و پنجم، پاییز ۱۳۹۹

صص ۱۴۲- ۱۲۵

DOI: https://dx.doi.org/10.22067/geoeh.2020.67030.0

مقاله پژوهشی

مدل‌سازی مسیرهای آتش در اکوتون‌های جنگل-علفزار در پارک ملی گلستان

رقیه جهدی[۱]- استادیار علوم و مهندسی جنگل، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

مهدی عربی- استادیار نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۸ تاریخ بازنگری : ۱۳۹۹/۹/۲۸ تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱۰/۶

چکیده

مدل‌سازی رفتار آتش می‌تواند درک ارتباطات بین آتش و محیطزیست آن شامل آب و هوا، توپوگرافی و تیپ‌های پوشش گیاهی موجود در سطح یک توده تا سیمای سرزمین را ساده کند و به مدیران برای بازسازی یا حفظ نقش طبیعی آتش کمک کند. در این مطالعه از الگوریتم حداقل زمان حرکت (MTT) در مدل گسترش آتش FlamMap برای بررسی مسیرهای اصلی رشد آتش و نیز احتمال سوختن به عنوان یک سنجه ریسک آتش در پارک ملی گلستان در شمال شرق ایران بر اساس شرایط آب و هوا و رخداد آتش مشاهده شده در دوره مطالعه (۱۳۹۹-۱۳۷۹) استفاده شد. این پارک ملی یک زون انتقالی بین دو اقلیم متفاوت یعنی نیمه‌مرطوب و معتدل (غرب و جنوب غربی) و سرد خشک (شرق و جنوب شرقی) است و پوشش گیاهی آن به‌طور عمده از رویش‌های هیرکانی (جنگل) و ایرانو-تورانی (علفزار) و اکوتون آن‌ها تشکیل شده است. با توجه به خروجی شبیه‌سازی مسیرهای اصلی گسترش آتش در پارک، بردارهای MTT از مواد سوختنی علفی خشک‌تر در بخش‌های جنوبی و شرقی عبور می‌کنند. این بردارها با حرکت از بخش‌های جنوبی و تقریباً با رسیدن به بخش مرکزی پارک به دو بردار اصلی به طرف جهت‌های شرقی و شمالی تقسیم می‌شود. مسیرهای مهم گسترش آتش با آزمون کای‌اسکوئر در سطح $P<0.05$ تعیین شد که همه این مسیرهای مهم در مدل‌های مواد سوختنی علفی قرار گرفته و تقریباً دوسوم آن‌ها نیز در اکوتون جنگل-علفزار پراکنش دارند. همچنین نقشه احتمال سوختن برآورد شده روندهای مکانی مشخصی را در پارک ملی نشان داد. بر اساس این نقشه بیش‌ترین احتمال سوختن در علفزارها و اکوتون در بخش جنوبی پارک در دامنه ارتفاعی ۲۰۰۰-۱۵۰۰ متری مشاهده شد. بخش‌های مرکزی رو به غرب و جنوب پارک

۱ نویسنده مسئول ۰۹۱۱۲۳۴۰۲۴۹

Email: roghayeh.jahdi@uma.ac.ir

تاب‌آوری بیشتری نسبت به آتش‌سوزی حتی در شرایط آب و هوای شدید آتـش دارنـد. در ایـن مطالعـه اکوتون جنگل-علفزار به عنوان نمونه‌ای از یک اکوسیستم طبیعی ارائه شده که از طریق کنتـرل ارتباطـات رفتار آتش و موزائیک ماده سوختنی در جهت افزایش تاب‌آوری در این سیمای سـرزمین مـی‌تـوان اقـدام نمود. شناسایی کریدورهای اصلی آتش می‌تواند به مدیران و تصمیم‌گیران اراضی در پـیش‌بینـی و تنظـیم پویایی‌های زمانی و مکانی رژیم‌های آتش طبیعی کمک کند.

کلیدواژه‌ها: احتمال سوختن، پارک ملی گلستان، مسیرهای آتش، FlamMap MTT.

۱- مقدمه

اکوتون‌ها مناطق با مرز مشترک پویایی است که در آنجا بیوم‌های زمینی اصلی با هم برخورد دارند. این اکوتون‌ها به آثار تغییر اقلیم و نیز فعالیت‌های انسانی حساس هستند. تغییرات محیطزیستی در اکوتون‌ها منجر به تغییـرات در ترکیب گونه‌ها، تنوع زیستی، ساختار و عملکرد می‌شود و در سطح اکوسیستم و سطح منطقه‌ای بکار می‌رود (کوتز و سمویز[۱]، ۲۰۰۱؛ میستر[۲]، ۲۰۱۲). این اکوتون‌ها به عنوان زون‌های انتقالی بین سیستم‌های اکولوژیکی مجاور (دلکورت و دلکورت[۳]، ۱۹۹۲) فرم‌های مختلف شامل ترکیب باز و پراکنده از تیپ‌های پوشش گیاهی نزدیک تـا یـک تقابـل شدید با شباهت ساختاری یا ترکیبی کم را به هم وصل می‌کند (کانور و همکاران[٤]، ۲۰۱۸). زون‌های اتصال بـین و درون تیپ‌های پوشش گیاهی مختلف در یک سیمای سرزمین منعکس‌کننده عوامل معینی است که وسعت جوامع اکولوژیکی مربوطه را تنظیم می‌کند. شکل‌گیری اکوتون بین جنگل و علفزار می‌تواند با عوامل توپـوگرافی، خـاکی، تغییرپذیری اقلیمی یا آتش تنظیم شود (کووپ و جیوینیش[٥]، ۲۰۰۷). فعل‌وانفعال‌های بین این عوامل و آستانه‌هـای محدودکننده‌ای که وسعت مکانی موزائیک پوشش گیاهی را تنظیم می‌کند پویایی‌های زمانی و مکانی این زون تماس را تعیین می‌کند (لیگ و وبلن[٦]، ۲۰۰٦)، اما احتمالاً نوسانات در این اکوتون در نتیجه تغییرات در فراوانـی و شـدت شرایط حداکثر به جای تغییرات در شرایط متوسط است (کیتزبرگر[۷]، ۲۰۱۲).

آتش نقش مهمی در تنظیم ارتباطات مکانی بین انواع تیپ‌های پوشش گیاهی مجاور در سطح توده تـا سـیمای سرزمین ایفا می‌کند (کانور و همکاران، ۲۰۱۸). اکوتون‌ها با تأثیر روی موزائیک مواد سوختنی سیمای سـرزمین کـه می‌تواند موانع یا کریدورهایی برای گسترش آتش ایجاد کند به صورت متقابل روی رفتار آتش اثر دارند (مـوریتز و

1 Kotze and Samways
2 Myster
3 Delcourt and Delcourt
4 Conver et al
5 Coop and Givnish
6 League and Veblen
7 Kitzberger

همکاران[1]، ۲۰۱۱). آتش نقش مهمی در اکوتون جنگل-علفزار با تثبیت پویای موقعیت مکانی حد واسط این دو جامعه ایفا می‌کند (فیشر و همکاران[2]، ۱۹۸۷)، از طریق مرگ‌ومیر نهال‌ها محدود کننده استقرار گیاهان چوبی است (بورن و همکاران[3]، ۱۹۹۷)، تسهیل‌کننده تجدیدحیات سریع گراس‌ها و علف‌ها است که گیاهان چوبی را از رقابت خارج می‌کند (مک‌پرسون[4]، ۱۹۹۵) و از تنوع گونه‌ها حفاظت می‌کند (پترسون و ریچ[5]، ۲۰۰۸). درحالی‌که در مطالعات زیادی بر نقش رخداد آتش در شکل‌گیری اکوتون‌های جنگل-علفزار تأکید شده است (کووپ و جیوینیش، ۲۰۰۸؛ اسچوتاگل[6] و همکاران، ۲۰۰۸؛ آموروسو[7] و همکاران، ۲۰۱۱)، پویایی‌های مکانی حرکت آتش در این زون اکوتونی، به‌ویژه در سیماهای سرزمین با مواد سوختنی ناهمگن کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. سیرولی و کالسنیک[8] (۲۰۱۰) به بررسی پویایی‌های آتش‌سوزی در اکوتون جنگل-علفزار در یک ذخیره‌گاه اکولوژیکی در آرژانتین و آثار آتش روی تجدیدحیات در این اکوسیستم پرداختند. بر اساس نتایج رخداد قابل توجه آتش و واکنش تاب‌آور به آن در علفزارها مشاهده شد. از سوی دیگر جنگل‌ها نیز تاب‌آور به این آتش‌سوزی‌ها شناخته‌شد و هیچ علائمی روی عملکرد آن مشاهده نشد. علیرغم اینکه برخی از گونه‌های مهاجم در منطقه قادر به بازسازی خود در برابر آتش در این اکوتون نبودند. هاروی و همکاران[9] (۲۰۱۷) به بررسی ساختار متغیر مکانی توده و ارتباطات آتش-اقلیم در یک اکوتون ارتفاعی جنگل-علفزار در غرب بریتیش‌کلمبیا در کانادا پرداختند. نتایج مطالعه آتش‌سوزی‌های با شدت مختلف در این اکوتون را نشان داد و آتش‌سوزی‌های مکرر با شدت کم غالب بودند و البته آتش‌سوزی‌های گسترده با شدت متوسط تا زیاد نیز قابل توجه بود. فالک و همکاران[10] (۲۰۱۱) به تجزیه و تحلیل تاریخچه آتش در اکوتون جنگل-علفزار در سیمای سرزمین یک ذخیره‌گاه ملی در نیومکزیکو آمریکا پرداختند و فراوانی آتش زیاد در این اکوتون شناسایی شد. همچنین در این منطقه کانور و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از الگوریتم حداقل زمان حرکت (MTT) در شبیه‌ساز رفتار و گسترش آتش FlamMap به بررسی مسیرهای رشد آتش برای شرایط مختلف آب و هوای آتش پرداختند. نتایج نشان داد که این اکوتون یک کریدور اصلی برای رشد آتش در این سیمای سرزمین است. تاکنون مطالعاتی در مورد بررسی رژیم آتش و تجزیه و تحلیل توزیع مکانی آتش در نواحی اکوتون در مناطق مختلف رویشی ایران انجام نشده است.

---

1 Moritz et al
2 Fisher et al
3 Boren et al
4 Mcpherson
5 Peterson and Reich
6 Schoennagel et al
7 Amoroso et al
8 Sirolli and Kalesnik
9 Harvey et al
10 Falk et al

به‌طورکلی سه روش شامل نمونه‌برداری پوشش گیاهی و خاک، آزمایش‌های میدانی و مدل‌سازی برای مطالعه پویایی‌های اکوتون‌های جنگل-علفزار وجود دارد (میستر، ۲۰۱۲). روش سوم یک ابزار مفید برای آزمودن فرضیه‌ها درباره کنترل‌ها روی رفتار آتش در یک دامنه گسترده‌ای از شرایط ماده سوختنی و آب و هوا است (کین و همکاران[1]، ۲۰۰۳؛ سالیس و همکاران[2]، ۲۰۱۳). بررسی منابع در ارتباط با مدل‌سازی آتش برای درک بهتر طرح‌های زمانی مکانی در ریسک آتش و پیشران‌های مرتبط انجام شد. این مطالعات شامل ارزیابی‌های فشار آتش در مقیاس بزرگ (تامپسون و همکاران[3]، ۲۰۱۱؛ ایگر و همکاران[4]، ۲۰۱٤؛ جهدی و همکاران[5]، ۲۰۲۰). ارزیابی استراتژی‌های تیمار ماده سوختنی (ایگر و همکاران، ۲۰۰۷)، برنامه‌ریزی جنگل در سطح سیمای سرزمین (گونزالس-اولاباریا و پوکالا[6]، ۲۰۱۱)، حمایت حوزه‌های آبخیز (تامپسون و همکاران، ۲۰۱۳)، پشتیبانی تصمیم‌گیری در سطح حادثه (کالکین و همکاران[7]، ۲۰۱۱؛ نونان-رایت و همکاران[8]، ۲۰۱۱)، ارزیابی مکانی ریسک برای ساختارها و ارزش‌ها (سالیس و همکاران، ۲۰۱۳، ۲۰۱٤) و ارزیابی آثار تغییر اقلیم (آرکا و همکاران[9]، ۲۰۱۲) است. استفاده از شبیه‌سازهای آتش در ارزیابی آتش در مقیاس سیمای سرزمین امکان تهیه نقشه‌های رفتار آتش مانند مسیرهای گسترش و شدت آتش مرتبط با پیشران‌های اصلی مانند آب و هوا، ماده سوختنی، توپوگرافی، و طرح‌های مکانی احتراق را فراهم می‌کند (میلر و ایگر[10]، ۲۰۱۳)/

بررسی تاریخچه آتش در پارک ملی گلستان نشان می‌دهد که آتش‌سوزی‌های سطحی رخدادهای مکرر در سیمای سرزمین جنگل-مرتع پارک است که در تنظیم موقعیت و ترکیب جوامع گیاهی این سیمای سرزمین نقش زیادی دارد (جهدی و همکاران، ۲۰۱٦). در این مطالعه از مدل‌سازی آتش با الگوریتم حداقل زمان حرکت در شبیه‌ساز FlamMap (فینی[11]، ۲۰۰٦) برای بررسی طرح‌های زمانی مکانی گسترش آتش در اکوتون جنگل-علفزار در پارک ملی گلستان استفاده شده است. این پارک ملی یکی از مناطق ایران است که بیشتر تحت تأثیر آتش‌سوزی‌ها است و یک منطقه حساس به آتش‌سوزی به دلیل شرایط و محیط‌زیست نیمه‌مدیترانه‌ای آن است. در مقایسه با سایر مطالعات انجام شده در زمینه آتش‌سوزی در پارک ملی گلستان (پورشکوری و همکاران، ۱۳۹۲؛ فرامرزی و همکاران، ۱۳۹۳؛ جهدی و همکاران، ۱۳۹٤)، هدف این مطالعه بررسی گسترش آتش در جنگل‌ها و علفزارها (مراتع)

1 Keane et al
2 Salis et al
3 Thompson et al
4 Ager et al
5 Jahdi et al
6 González -Olabarria and Pukkala
7 Calkin et al
8 Noonan-Wright et al
9 Arca et al
10 Miller and Ager
11 Finney

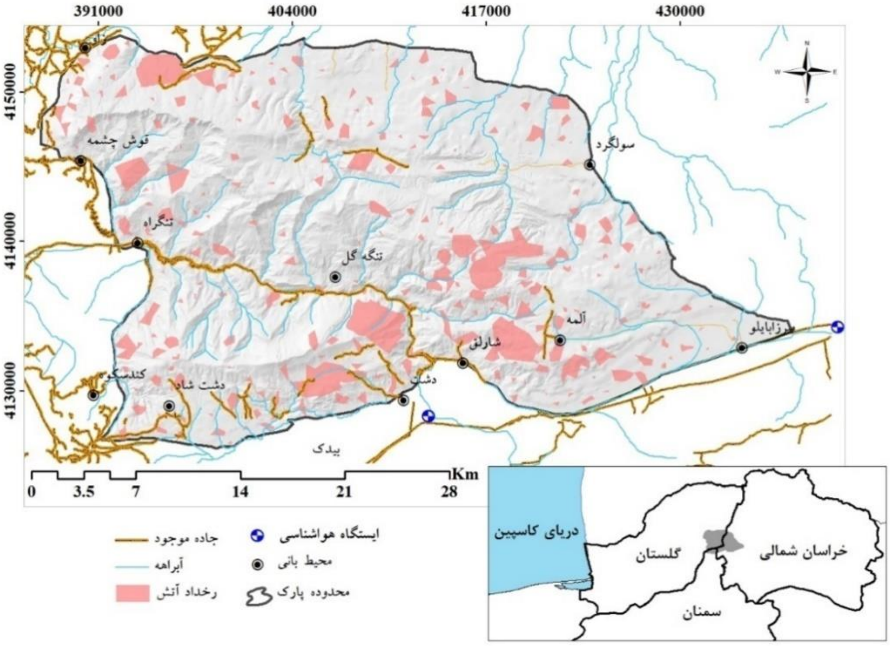
و اکوتون حائل آن‌ها به منظور تعیین مسیرهای اصلی گسترش آتش و تجزیه و تحلیل احتمال سوختن به عنوان یک سنجه ریسک آتش در این پارک است. به‌طور مشخص، گستره‌ای را که در آن این اکوتون به عنوان یک کریدور اصلی برای حرکت آتش در سیمای سرزمین پارک ملی بر اساس مشخصات ماده سوختنی، توپوگرافی و آب و هوای آتش عمل می‌کند در مقایسه با علفزارها و جنگل‌های مجاور مورد بررسی قرار می‌گیرد. درک عواملی که مسیرهای اصلی گسترش آتش در این سیمای سرزمین بزرگ جنگل–علفزار را تعیین می‌کند نقش مهمی در مدیریت پیشگیری، کنترل و اطفای آتش در این منطقه و سایر مناطق مشابه دارد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مطالعه

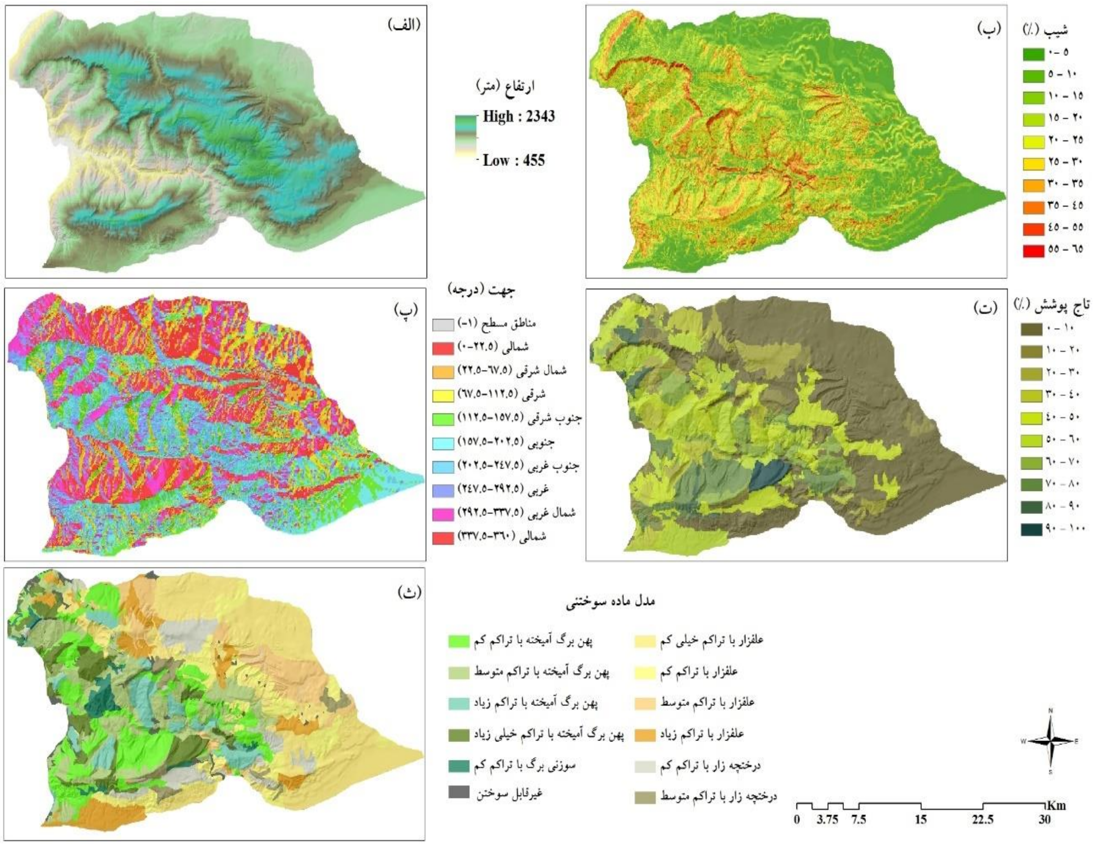
این مطالعه در پارک ملی گلستان ('۳۷°۳۱ -'۱۷ °۳۷ عرض شمالی، '۵٦°٤۳ -'۵۵°۱۷ طول شرقی)، در شمال شرق ایران با وسعت ۸۷,٤۰۲ هکتار انجام شد (شکل ۱). این پارک ملی یک سیمای سرزمین ایده‌آل برای این مطالعه به دلیل وسعت مکانی بزرگ و ترکیب جوامع گیاهی غالب آن (شکل ۲) است. موقعیت اکوتون جنگل–مرتع در پارک به‌طورکلی مرتبط با یک تغییر توپوگرافی از مکان‌های با شیب متوسط تند در غرب تا شیب سطحی در بخش جنوبی و شرقی است. توپوگرافی پارک با دامنه‌های کوهستانی با شیب شدید در بخش‌های غربی و جنوب مرکزی و ناحیه دشتی واقع شده در بخش شرقی به نام دشت میرزابایلو مشخص شده است (شکل ۲). این پارک در مرز بین اقلیم‌های نیمه مرطوب خزری و نیمه خشک قرار گرفته و با توجه به جهت‌های عمده گوناگون و پستی و بلندی‌های شدید دارای اقلیم‌های متنوعی است که منجر به ایجاد جنگل‌های پهن‌برگ در بخش غربی، جنگل‌های سوزنی‌برگ در ارتفاعات و مراتع در بخش‌های شرقی و شمالی آن شده است. دامنه نوسان‌های بارندگی از ۲۰۰ تا ۷۵۰ میلی‌متر است که از غرب به شرق و نیز از مناطق مرتفع به مناطق پست پارک از شدت نزولات کاسته می‌شود (آخانی[1]، ۱۹۹۸، ۱۹۹۹؛ لیلیان و همکاران[2]، ۲۰۱۰). دمای متوسط سالانه بین ۱۲ تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد متغیر است. رطوبت هوا بین ۸۰–٦۰٪ متغیر است. بیش‌ترین فراوانی بادها، بادهای غربی با سرعت ٦ متر در ثانیه و شدیدترین بادهای منطقه دارای جهت شمالی–شرقی با سرعت ۱۲ متر در ثانیه است (غلامی و مصداقی، ۱۳۹۰؛ شکل ۳).

1 Akhani
2 Leylian et al



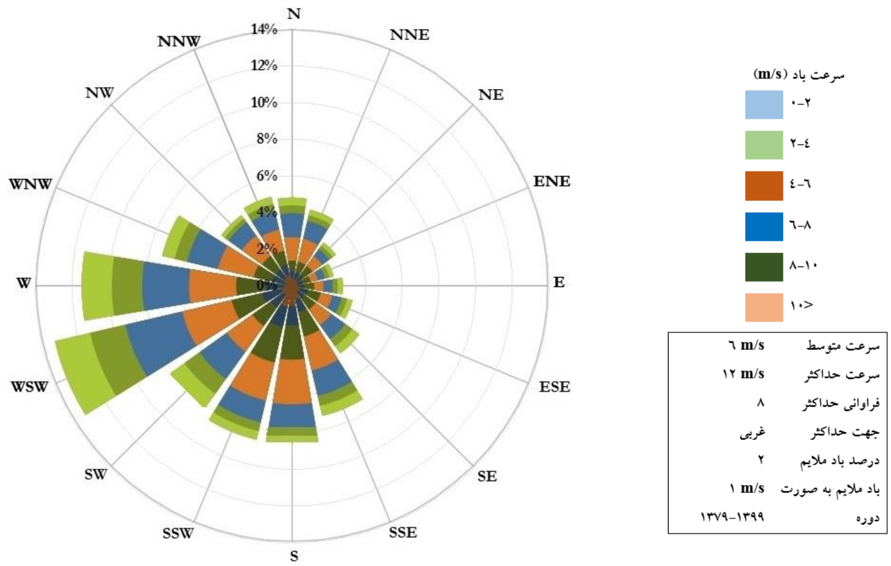
شکل ۱- محدوده پارک ملی گلستان در شمال شرق ایران و توزیع رخداد آتش در دوره مطالعه در پارک ملی.

تقریباً نیمی از پارک از جنگل‌های پهن‌برگ (۴۱٪) بـا گونـه‌هـای غالـب شـامل بلـوط بلنـدمازو (*Quercus castaneifolia* C.A.Mey.,)، ممرز (*Carpinus betulus* L.,)، لور (*Carpinus orientalis* Mill.,) و افرا شیردار (*Acer cappadocicum* Gled.) به همراه درختچه‌هـای سـوزنی‌بـرگ ارس (۸٪) شـامل دو گونـه غالـب اردوج (*Juniperus excelsa* M. Bieb) در نواحی پرشیب کوهستانی و پیرو (*Juniperus communis* L.) در دامنه‌ها همراه با درختچه‌های زرشک و دغدغک با زیراشکوب گیاهان مرتعی پوشیده شده اسـت (جهـدی و همکـاران، ۱۳۹٤). بخش قابل توجهی از پارک نیز مراتع نیمه‌استپی (٤۸٪) به‌ویژه در مناطق شرقی پارک بـه صـورت تپـه‌مـاهوری بـا پوشش‌های علفی با غالبیت گونه‌های *Artemisia siberi*، *Stipa barbata*، *Agropyron* spp.، *Bromus persicus*، *Hordeum bulbosum* و *Astragalus spp.* است (قدسی و همکاران، ۱۳۹۰). کمتر از ۲٪ پارک نیز به‌صورت پراکنده از بخش‌های غیرقابل سوختن شامل اراضی لخت و سنگلاخی، کشاورزی و توسعه‌یافته تشکیل شده است (جهدی و همکاران، ۲۰۱٦).



شکل ۲- ورودی‌های مکانی برای مدل شبیه‌سازی آتش FlamMap MTT: الف) ارتفاع، ب) شیب، پ) جهت، ت) تاج پوشش و ث) مدل ماده سوختنی.

در طول بیست سال گذشته، بیش از ده هزار هکتار از پارک ملی گلستان سوخته شده است. آتش‌سوزی‌های چشمه‌سردار (۸۶۹ هکتار) در آبان و آذر ۱۳۸۹ (پورشکوری و همکاران، ۱۳۹۲) و منطقه شارلق (۳۰۰۰ هکتار) در شهریور ۱۳۹۲ (فرامرزی و همکاران، ۱۳۹۳) از عمده‌ترین حوادث رخ‌داده است. اطلاعات مربوط به حوادث آتش-سوزی در پارک بر اساس گزارش‌های حریق ثبت‌شده توسط اداره مرکزی پارک، اطلاعات محیط‌بانان و نیز مساحی لکه‌های آتش باقیمانده با استفاده از GPS بدست آمده است. همچنین اطلاعات هواشناسی مربوط به دوره مطالعه از نزدیک‌ترین ایستگاه‌ها به پارک ملی شامل ایستگاه کلیماتولوژی دشت گلستان و ایستگاه هواشناسی خودکار رباط قره‌بیل تهیه شد (شکل ۱).



شکل ۳- گلباد برای جهت باد و سرعت باد در طول فصل حریق در منطقه مطالعه در دوره مورد مطالعه. طول میله‌ها درصد روزها با جهت باد مشخص در طول فصل حریق است.

۲-۲- مدل‌سازی آتش

الگوریتم گسترش آتش حداقل زمان حرکت (MTT) فینی (۲۰۰۲) به‌طور گسترده‌ای برای تجزیه و تحلیل ریسک آتش و تشخیص رفتار آتش مورد استفاده قرار گرفته است (ایگر و همکاران، ۲۰۰۷؛ سالیس و همکاران، ۲۰۱۳، ۲۰۱٤؛ جهدی و همکاران، ۲۰۱٦، ۲۰۲۰). این الگوریتم از داده‌های ورودی مکانی شامل توپوگرافی (شیب، جهت، ارتفاع) و مدل ماده سوختنی سطحی و مشخصات ماده سوختنی تاجی استفاده می‌کند که به صورت یک فایل سیمای سرزمین باینری (LCP) ترکیب می‌شود. مواد سوختنی سطحی با مدل‌های ماده سوختنی که شامل مشخصات بار ماده سوختنی زنده و مرده (با کلاسه اندازه)، نسبت سطح به حجم برای مواد سوختنی زنده و مرده، عمق بستر ماده سوختنی، رطوبت اطفا و محتوای گرما است توصیف می‌شود. این مدل‌های ماده سوختنی از طریق اندازه‌گیری‌های میدانی، با استفاده از راهنماهای تصاویر، یا بر اساس سایر منابع داده یعنی مدل‌های ماده سوختنی استاندارد (اندرسون[1]، ۱۹۸۲؛ اسکات و بورگان[2]، ۲۰۰۵) تهیه می‌شود. در این مطالعه تهیه نقشه‌های مدل‌های ماده سوختنی محلی و تاج پوشش بر اساس روش نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی شده با ٥٤ قطعه نمونه‌های مربع شکل شامل علفزار (۲٤ قطعه‌نمونه ۱m×۱m)، درختچه‌زار (۸ قطعه‌نمونه ۱۰m×۱۰m) و جنگل (۲۲ قطعه‌نمونه ۳۰m×۳۰m) در تابستان و پائیز سال ۱۳۹۸ انجام شد. مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متری برای تهیه نقشه‌های ارتفاع، شیب و جهت

1 Anderson
2 Scott and Burgan

استفاده شد (شکل ۲). داده‌های مکانی توپوگرافی و ماده سوختنی منطقه مطالعه با ArcFuels (ایگر و همکاران، ۲۰۱۱) در اندازه تفکیک ۱۰ متری پردازش شد. همچنین نقشه طرح‌های تاریخی احتراق در پارک با استفاده از داده حوادث آتش جمع‌آوری شده از مشاهدات آتش در بیست سال گذشته تهیه شد (شکل ۱).

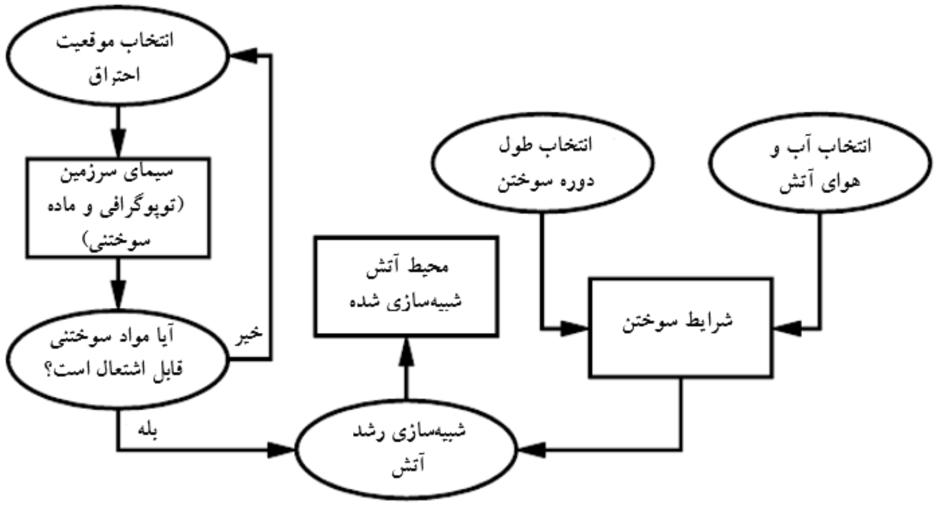
جهت باد و سرعت باد غالب در طول فصل‌های تابستان و پائیز (دوره حریق) در منطقه مطالعه به عنوان پارامترهای شبیه‌سازی انتخاب شد. مطابق اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده (شکل ۱) جهت ۲۴۰ درجه متداول‌ترین جهت باد در منطقه است (شکل ۳). این جهت معرف جهت باد بیش از ۴۰٪ از کل روزها در طول فصل حریق در منطقه مطالعه است. سرعت باد ٦ m/s نیز به عنوان متوسط سرعت باد غالب منطقه انتخاب شد.

از الگوریتم MTT برای شبیه‌سازی مسیرهای گسترش آتش با توجه به شرایط آب و هوای تاریخی آتش و سرعت و جهت باد متوسط مشاهده شده در پارک در طول فصل حریق در دوره مطالعه (۱۳۹۹–۱۳۷۹) استفاده شد. این الگوریتم یک نمایش برداری از رشد آتش با محاسبه زمان بری حرکت آتش از یک نقطه سلول به نقاط سلول مجاور ارائه می‌دهد (فینی، ۲۰۰۲). حرکت آتش با کوتاه‌ترین زمان حرکت از نقطه‌ای به نقطه دیگر تعریف می‌شود. در واقع مسیرهای MTT کریدورهایی با کمترین مقاومت برای رشد آتش بر اساس داده زنده و غیرزنده موجود در فایل سیمای سرزمین و ورودی‌های باد و آب و هوا را ترسیم می‌کند. مسیرهای وکتوری آتش تولید شده در شبیه-سازی‌های MTT به شبکه‌های رستری باینری تبدیل شد و جمع آن‌ها برای تعیین تعداد دفعاتی که هر سلول ۱۰ متری سوخته شده، محاسبه شد. از آزمون کای‌اسکوئر در سطح P<۰/۰۵ برای تعیین مناطقی که کریدورهای مهمی برای رشد آتش در این سیمای سرزمین هستند استفاده شد.

در این مطالعه بر پایه نتایج شبیه‌سازی آثار احتراق و گسترش آتش‌سوزی‌های تاریخی در پارک ملی محاسبه احتمال سوختن مشخص مکانی در سطح سیمای سرزمین پارک ملی گلستان بر اساس روش ارائه شده در شکل ٤ با استفاده از مدل FlamMap MTT انجام شد. در این روش شبیه‌سازی رشد آتش بر اساس عوامل فیزیکی کنترل گسترش آتش با مولفه‌های احتمالی (در نتیجه تغییرپذیری زمانی و مکانی) در مقیاس بزرگ از رژیم‌های آتش (شامل احتراق‌های مکانی و شرایط آب و هوای آتش) در یک سیمای سرزمین با مواد سوختنی و توپوگرافی مشخص انجام می‌شود. در این مدل‌سازی سطحی که می‌سوزد برای هر آتش‌سوزی ثبت می‌شود و در نهایت در یک شبکه تجمعی از منطقه سوخته‌شده جمع می‌شود. محصول نهایی یک نقشه احتمال سوختن (BP) است که در آن BP هر سلول i به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$BP_i = \frac{b_i}{N} \times 100 \qquad (1)$$

که در آن b_i تعداد دفعاتی است که یک سلول i می‌سوزد و N تعداد کل شبیه‌سازی‌ها (معمولاً ۱۰۰۰≤) اســت. BP_i درصد احتمال سالانه که سلول i می‌سوزد را نشان می‌دهد (میلر و همکاران[1]، ۲۰۰۸). مدل احتمال سوختن نه تنها توزیع زمانی و مکانی احتراق‌ها، بلکه زمینه‌های مکانی که روی گسترش آتش اثر می‌گذارد را نیز در نظر مـی-گیرد. توپولوژی مکانی گسترش آتش به‌ویژه در تهیه نقشه ریسک آتش مهم است، زیرا تغییرات در احتمال سوختن می‌تواند فراتر از یک مشخصه سیمای سرزمین باشد که آتش‌سوزی‌های پیش‌رو را افزایش یـا تغییـر دهـد (فینـی، ۲۰۰۵).



شکل ٤- شبیه‌سازی رشد آتش برای تهیه نقشه احتمال سوختن در مدل FlamMap MTT (Finney, 2006). جعبه‌های مستطیلی ورودی‌ها/خروجی‌های مدل و جعبه‌های بیضوی فرآیندهای مدل را نشان می‌دهد. این فرآیند تا زمان دست‌یابی به تعداد مشخص شبیه‌سازی‌ها تکرار می‌شود. تعداد احتراق‌ها در هر شبیه‌سازی توسط کاربر انتخاب می‌شود (میلر و همکاران، ۲۰۰۸).

۳- نتایج و بحث

شناسایی اکوتون مسئله اصلی این مطالعه بود، بنابراین فایل‌های رستری حاصل از شبیه‌سازی به سه طبقـه مـاده سوختنی کلی شامل علفی، درختچه‌ای و درختی جمع و ارزش‌ها از فایل رستری MTT جمع‌شده برای هـر طبقـه مدل ماده سوختنی استخراج شد. طبقه مدل ماده سوختنی درختچه‌ای از این تجزیه و تحلیل حذف شد زیرا تنها ۸٪ از ماده سوختنی موجود در سیمای سرزمین پارک را به خود اختصاص می‌دهد (جدول ۱).

1 Miller et al

جدول ۱- توصیف مدل‌های ماده سوختنی محلی در منطقه مطالعه با تجمیع آن‌ها در سه طبقه مدل ماده سوختنی علفی، درختچه‌ای و درختی.

طبقه مدل	نام مدل	سطح (ha)	پوشش (٪)
علفی	علفزار با تراکم خیلی کم	۲۱۵۵۶/۰۵	۲٤/٦٦
	علفزار با تراکم کم	۸۵۵۰/۹٦	۹/۷۸
	علفزار با تراکم متوسط	٦٤۰۰/۲۰	۷/۳۲
	علفزار با تراکم زیاد	۵۹٦۲/۵۱	٦/۸۲
درختچه‌ای	درختچه‌زار با تراکم کم	۵۰٦۷/۱٦	۵/۸۰
	درختچه‌زار با تراکم متوسط	۲۲٤٤/۱۸	۲/۵۷
درختی	پهن‌برگ آمیخته با تراکم کم	۱۲۰۱۱/۷٤	۱۳/۷٤
	پهن‌برگ آمیخته با تراکم متوسط	۱۱٤۷۱/۲٦	۱۳/۱۲
	پهن‌برگ آمیخته با تراکم زیاد	٤۸۳۲/۹۳	۵/۵۳
	پهن‌برگ آمیخته با تراکم خیلی زیاد	۵٦۲۲/۵۳	٦/٤۳
	سوزنی‌برگ با تراکم کم	۲۰۱۱/۹۲	۲/۳۰
غیرقابل سوختن		۱٦٦۹/۵٦	۱/۹۱
کل		۸۷٤۰۲	۱۰۰

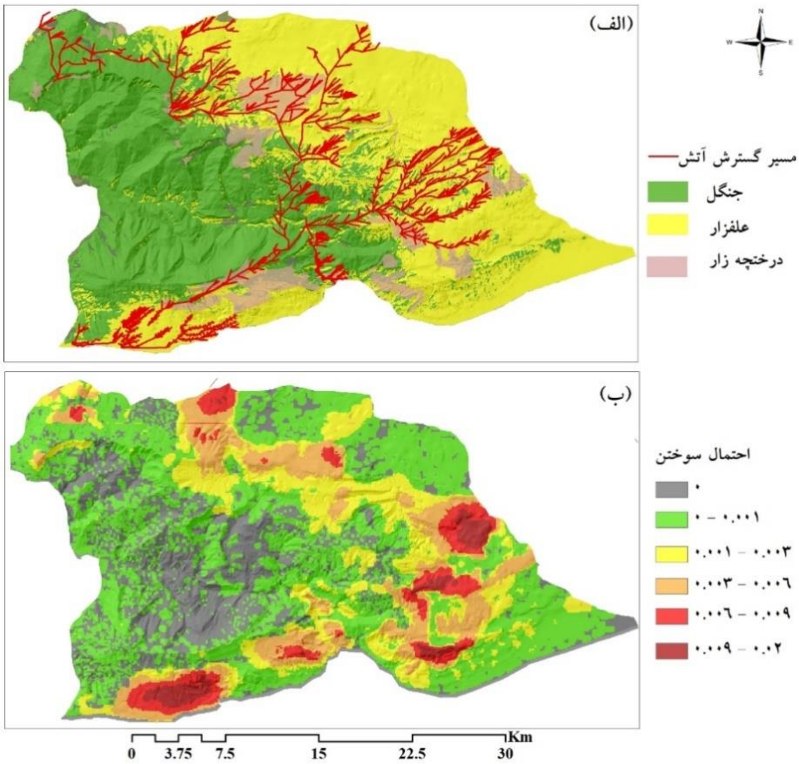
تعداد آتش‌سوزی مورد انتظار با ضرب تعداد آتش‌سوزی‌های شبیه‌سازی‌شده به نسبت مواد سوختنی علفی و درختی محاسبه شد (جدول ۲). از آنجایی که مدل‌های ماده سوختنی درختچه‌ای از آزمون کای‌اسکوئر حذف شده است، در جدول ۲ این مدل‌ها ارائه نشده است و نسبت سیمای سرزمین به ۱۰۰٪ نمی‌رسد. در این مطالعه ۳۲٤ فقره حریق شبیه‌سازی‌شده، در حالی که تعداد آتش‌سوزی‌های مورد انتظار در این جدول نیز به ۳۲٤ نمی‌رسد، چون انتظار بر این است که بخشی از آن در مواد سوختنی درختچه‌ای رخ دهد. انتظار بر این است که مواد سوختنی علفی ۱۵۷ بار و مواد سوختنی درختی ۱۳۳ بار بسوزند. مجموع مسیرهای MTT در هر سلول تعداد آتش مشاهده شده را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در آزمون کای‌اسکوئر فرض بر این است که احتمال رخداد آتش در هر سلول یکسان است و تفاوت‌های مربوط به پتانسیل سوختن بین مواد سوختنی مختلف مانند علفی و درختی را در نظر نمی‌گیرد. بنابراین تعداد مورد انتظار آتش درصدی از مدل‌های ماده سوختنی جمع‌شده در این سیمای سرزمین است.

جدول ۲- تعداد آتش مورد انتظار برای هر سلول، نسبتی از سیمای سرزمین برای مدل‌های ماده‌سوختنی جمع‌شده و نسبت مورد انتظار و مشاهده‌شده آتش‌سوزی‌های مدلسازی‌شده برای هر طبقه برای آتش‌سوزی‌های شبیه‌سازی-شده.

مدل‌های ماده‌سوختنی / متغیر	علفی	درختی
تعداد سلول‌ها	٤٢٤٦٩٧٢	۳۵۹۵۰۳۸
نسبتی از سیمای سرزمین	٤٨/٥٩	٤١/١٣
تعداد آتش‌سوزی مورد انتظار در هر سلول	١٥٧/٤٣	١٣٣/٢٦
حداکثر تعداد آتش‌سوزی مشاهده‌شده در هر سلول (٪ از آتش‌سوزی‌های شبیه‌سازی‌شده)	١٧٨ (٥٤/٩٤)	١٩١ (٥٨/٩٥)

بر اساس نتایج بدست آمده بردارهای گسترش آتش تحت تأثیر اکوتون جنگل-علفزار در بیشتر موارد هستند (شکل ۵). در حالی که در بخش‌های غربی پارک که میزان بارندگی بیشتر بوده و دارای آب و هوای مرطوب و معتدل است و جنگل‌های مناطق نیمه مرتفع و مرتفع هیرکانی شکل گرفته است، به دلیل رطوبت زیاد ماده سوختنی مقاومت بیش‌ترین نسبت به گسترش آتش دارند. در مقابل در شرقی‌ترین بخش پارک، نواحی استپی خشک با بارندگی کم در برگیرنده جوامع گیاهی تشکیل‌دهنده رویشگاه ایرانو-تورانی است و بردارهای MTT از مواد سوختنی علفی خشک‌تر در این بخش عبور می‌کند. بردارهای آتش اکوتون‌های جنگل-علفزار را در همه جهت‌های پارک ملی دنبال می‌کنند. این بردارها با حرکت از بخش‌های جنوبی و تقریباً با رسیدن به بخش مرکزی پارک به دو بردار اصلی به طرف جهت‌های شرقی و شمالی تقسیم می‌شود (شکل ۵). نتایج این مطالعه نشان داد که آتش به راحتی در نزدیکی اکوتون جنگل-علفزار حرکت می‌کند که با نتایج فالک و همکاران[1] (۲۰۱۱) و کانور و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد. همچنین این نتیجه که مناطق اکوتون کریدورهای مهم آتش در پارک ملی گلستان است با مطالعات مکانی حوادث آتش تاریخی انجام شده در منطقه مطابقت نیز دارد. بر اساس مطالعات پورشکوری و همکاران (۱۳۹۲) و فرامرزی و همکاران (۱۳۹۳) آتش‌سوزی‌های گسترده با شدت زیاد در بخش جنوبی پارک ملی مشاهده شده است که قسمت عمده‌ای از اکوتون جنگل-علفزار در پارک ملی است. بر اساس نتایج آزمون کای-اسکوئر، از ۸۷٤٠٢٠٠ سلول درون منطقه مطالعه، ٣٤٩٦١ سلول (٠/٤٪) به اندازه‌ای سوخت که در سطح P<٠/٠٥ معنی‌دار و مهم است. همه سلول‌های مهم در مدل‌های مواد سوختنی علفی واقع شده است. تقریباً دوسوم این سلول-های مهم در اکوتون جنگل-علفزار پراکنش دارند.

1 Falk et al



شکل ۵- مسیرهای اصلی گسترش آتش ترسیم‌شده با آنالیز حداقل زمان حرکت FlamMap (الف) و برآوردهای احتمال سوختن در سیمای سرزمین پارک ملی گلستان (ب).

اکوتون‌های جنگل-علفزار کریدورهای مهمی برای رشد آتش در سیمای سرزمین پارک ملی است. مولفه‌های مثلث سوختن (ماده سوختنی، گرما و اکسیژن) در طول این اکوتون به‌صورت بهینه می‌باشد، که شامل بستر ماده سوختنی پیوسته از مواد سوختنی ریز و سبک است و به سرعت با خشک‌شدن فوری با آتش می‌سوزند. رطوبت‌های کمتر ماده سوختنی در بخش‌های جنوبی در نتیجه وضعیت توپوگرافی این ناحیه و مسیرهای باد است که کنتورهای توپوگرافی را دنبال می‌کند. توپوگرافی در تعیین کریدورهای اصلی آتش در سیمای سرزمین پارک به روش‌های مختلف اثرگذار است. نخست، توپوگرافی روی توزیع مکانی تیپ‌های ماده سوختنی به‌ویژه در سیماهای سرزمین با گرادیان‌های ارتفاعی اساسی اثر می‌گذارد (پارکز و همکاران[1]، ۲۰۱۲). دوم، فعل و انفعال بین باد، ماده سوختنی و توپوگرافی روی رفتار کریدورهای آتش در طول اکوتون اثر می‌گذارد (کووپ و جیوینیش، ۲۰۰۸). در مقایسه اثر توپوگرافی و ماده سوختنی روی گسترش آتش، با توجه به نتایج بدست آمده در این مطالعه می‌توان گفت که اثر ترکیب و توزیع ماده سوختنی بیش از توپوگرافی قابل توجه است. این نتیجه مطابق با نتیجه پارکز و همکاران

1 Parks et al

(۲۰۱۲) است که دریافتند ترکیب ماده سوختنی چهاربرابر مهم‌تر از توپوگرافی برای گسترش آتش در منطقه مورد مطالعه است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که پوشش‌های جنگلی پهن‌برگ مرطوب در پارک مسیرهای اصلی گسترش آتش تحت شرایط آب و هوایی نرمال نیستند. جریان هوای خنک در توده‌های جنگلی انبوه در غرب پارک همراه با تکرار رخدادهای آتش‌سوزی سطحی با شدت کم موقعیت اکوتون جنگل–علفزار را کنترل می‌کند. این نتیجه مشابه با نتیجه مطالعه هاروی و همکاران (۲۰۱۷) در تکرار زیاد آتش‌سوزی‌های با شدت کم در مناطق جنگلی در مقایسه با آتش‌سوزی‌های شدید در بخش علفزار و اکوتون است.

نقشه احتمال سوختن (شکل ۵) روندهای مکانی مشخصی را از این سنجه ریسک آتش نشان می‌دهد. بخش‌های مرکزی رو به غرب و جنوب پارک مقاومت بیشتری نسب به آتش‌سوزی حتی در شرایط آب و هوای شدید آتش دارند. آتش می‌تواند بخش‌هایی از جنگل‌ها را بسوزاند اما رفتار آن به شدت آتش‌سوزی‌ها در علفزارهای خشک موجود نخواهد بود. این مورد در شمال غربی پارک در جایی که در چند نقطه آتش رخ‌داده مشخص است. بخش‌های جنوبی و شرقی پارک دارای بیش‌ترین احتمال سوختن هستند که نشان می‌دهد این مناطق گسترش آتش را به سمت مرکز پارک تسهیل می‌کند. همچنین احتمال سوختن به گرادیان ارتفاعی در منطقه مطالعه واکنش نشان می‌دهد، به نحوی که بیش‌ترین احتمال سوختن در علفزارها و اکوتون در بخش جنوبی پارک در دامنه ارتفاعی ۲۰۰۰–۱۵۰۰ متری است. در این مطالعه دامنه ارزش‌های احتمال سوختن در سطح پیکسل بین ۰ الی ۰/۰۲ برآورد شده است. بر اساس مطالعات ایگر و همکاران (۲۰۰۷) و فالک و همکاران (۲۰۱۱) پیکسل‌ها با بیش‌ترین احتمال سوختن مرتبط با مسیرهای اصلی گسترش آتش هستند. نتایج مدل‌سازی مسیرهای گسترش آتش و احتمال سوختن بدست آمده در پارک ملی گلستان نیز با این مطالعات مطابقت دارد. به‌طور کلی احتمال سوختن در نتیجه فعل و انفعال‌های پیچیده بین توپوگرافی، مواد سوختنی، آب و هوا و احتراق‌ها است. تجزیه و تحلیل‌های مکانی احتمال سوختن می‌تواند برای ارزیابی طرح‌های تغییر مواد سوختنی به منظور کاهش ریسک آتش یا نحوه توزیع منابع کنترل آتش استفاده شود (پاریسین و همکاران[1]، ۲۰۱۹؛ بورلی و مک‌لوگلین[2]، ۲۰۱۹).

٤- نتیجه‌گیری

اکوتون جنگل–علفزار در پارک ملی گلستان به عنوان منطقه مهم برای حرکت آتش است و مسیرهای MTT یک سیمای سرزمین اشتعال‌پذیر با کریدورهای احتمالی آتش بسیاری را در این منطقه نشان می‌دهد. درک و شناسایی مهم‌ترین مسیرها برای رشد آتش می‌تواند به مدیران اراضی در برنامه‌ریزی اقدامات پیشگیرانه حریق و حفظ این اکوتون به عنوان یک پیوند قوی از آتش و فعالیت‌های بیولوژیکی کمک کند. همچنین با توجه به آتش‌سوزی‌های

1 Parisien et al
2 Beverly and McLoughlin

بزرگی که در دو دهه اخیر در اکوسیستم باارزش پارک ملی گلستان رخ داده است و نیز تکرار رو به افزایش آتش در اکوسیستم‌های طبیعی در مناطق مختلف ایران، تلاش‌ها برای بازسازی و احیای مناطق سوخته‌شـده مـی‌توانـد روی افزایش تاب‌آوری نسبت به آتش‌سوزی در مناطق اکوتون متمرکز شود. بررسی ارتباطات اقلیم–آتش و ساختار توده می‌تواند روش موثری برای شناسایی و درک عوامل مؤثر بر رخداد و شدت آتش در مقیاس سیمای سرزمین ارائـه دهد. درک این ارتباطات در گذشته و زمینه‌سازی این ارتباطات برای آینده در مواجه با تغییر اقلیم از اهمیت زیادی برخوردار است. اگرچه طرح‌هایی که از نظر تاریخی شناسایی شده‌اند ممکن است مستقیماً در مورد سناریوهای آتی آب و هوا اعمال نشوند، اما می‌توانند بینش‌های مهمی ارائه دهند. مدیریت سیمای سرزمین با مواد سوختنی ناهمگن می‌تواند منجر به افزایش تاب‌آوری محیط‌زیستی و اقتصادی–اجتماعی اکوسیستم شود. با افزایش آشفتگی‌های طبیعی مانند آتش‌سوزی، آفات و بیماری‌ها و خشکی از نظر فراوانی، وسعت و مدت، چارچوب‌های اکوسیستم‌های طبیعی سازگار با تغییرات اقلیمی و انسان‌ساخت مورد نیاز است.

کتابنامه

پورشکوری الهده، فرخ؛ درویش صفت، علی اصغر؛ صمدزادگان، فرهاد؛ عطارد، پدرام؛ سلیاری، جواد؛ ۱۳۹۲. ارزیابی الگوریتم جهانی کشف آتش در شناسایی آتـش فعـال در عرصـه‌های منـابع طبیعـی بـه کمـک تصـاویر سـنجنده MODIS (مطالعه موردی :پارک ملی گلستان). *پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل*. ۲۳ (٤): ۹۷–۸۱.

جهدی، رقیه؛ درویش‌صفت، علی‌اصغر؛ اعتماد، وحید؛ ١٣٩٤. ارزیابی اثر وضعیت رطوبت ماده سوختنی بر گسترش و رفتار آتش در پارک ملی گلستان. *جنگل و فرآورده‌های چوب، مجله منابع طبیعی ایران*. ٦٨ (٤): ۸۱۳–۷۹۹.

غلامی، نغمه؛ مصداقی، منصور؛ ۱۳۹۰. بررسی الگوی مکانی درختچه‌ها در بیشه پارک ملی گلستان. *تحقیقات مرتـع و بیابان ایران*. ۱۸ (٤): ۵۱۵–۵۲۵.

فرامرزی، حسن؛ حسینی، سیدمحسن؛ غلامعلی‌فرد، مهدی؛ ۱۳۹۳. پهنه‌بندی مخاطره آتش‌سوزی پارک ملی گلستان بـا استفاده از رگرسیون لجستیک. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۱۰: ۹۰–۷۳.

قدسی، مرضیه؛ مصداقی، منصور؛ حشمتی، غلامعلی؛ ۱۳۹۰. بررسی اثر گیاهان با فرم‌های رویشی مختلف بر ویژگـی-های سطح خاک (مطالعه موردی: مراتع نیمه استپی پارک ملی گلستان). *پژوهش‌های آبخیزداری*. ۹۳: ٦۹–٦۳.

Ager, A.A., Finney, M.A., Kerns, B.K., & Maffei, H., 2007. Modeling wildfire risk to northern spotted owl (Strix occidentalis caurina) habitat in Central Oregon, USA. Forest Ecology and Management. 246: 45–56.

Ager, A.A., Day, M.A., McHugh, C.W., Short, K., Gilbertson- Day, J., Finney, M.A., & Calkin, D.E., 2014. Wildfire exposure and fuel management on western US national forests. Journal of Environmental Management. 145: 54–70.

Akhani, H., 1998. Plant Biodiversity of Golestan National Park, Iran. Stapfia. 53: 1–411.

Akhani, H., 1999. Studies on the flora and vegetation of the Golestan National Park, NE Iran, III. Three new species, one new subspecies and fifteen new records for Iran. Edinburgh Journal of Botany. 56 (1): 1–31.

Arca, B., Pellizzaro, G., Duce, P., Salis, M., Bacciu, V., Spano, D., Ager, A.A., Finney, M.A., & Scoccimarro, E., 2012. Potential changes in fire probability and severity under climate change scenarios in Mediterranean areas. In Spano D, Bacciu V, Salis M, Sirca C (eds.), 2012. Modelling Fire Behavior and Risk. 92– 98.

Amoroso, M.M., Daniels, L.D., Bataineh, M., & Andison, D.W., 2011. Evidence of mixed-severity fires in the foothills of the Rocky Mountains of west-central Alberta, Canada. Forest Ecology and Management. 262: 2240–2249.

Beverly, J.L., & McLoughlin, N., 2019. Burn probability simulation and subsequent wildfire activity in Alberta, Canada – Implications for risk assessment and strategic planning. Forest Ecology Management. 451: 117490.

Boren, J.C., Engle, D.M., Gregory, M.S., Masters, R.E., Bidwell, T.G., & Mast, V.A., 1997. Landscape structure and change in a hardwood forest-tall-grass prairie ecotone. Journal of Range Management. 50: 244-249.

Calkin, D.E., Thompson, M.P., Finney, M.A., & Hyde, K.D., 2011. A real-time risk assessment tool supporting wildland fire decision making. Journal of Forestry. 109 (5): 274– 280.

Conver, J.L., Falk, D.A., Yool, S.R., & Parmenter, R.R., 2018. Modeling Fire Pathways in Montane grassland-forest ecotones. Fire Ecology. 14 (1): 17-32.

Coop, J.D., & Givnish, T.J., 2007. Spatial and temporal patterns of recent forest encroachment in montane grasslands of the Valles Caldera, New Mexico, USA. Journal of Biogeography. 34: 914-927.

Coop, J.D., & Givnish, T.J., 2008. Constraints on tree seedling establishment in montane grasslands of the Valles Caldera, New Mexico. Ecology. 89: 1101-1111.

Delcourt, P.A., & Delcourt, H.R., 1992. Ecotone dynamics in space and time. Pages 19-54 in: A.J. Hansen and F. diCastri, editors. Landscape boundaries: consequences for biotic diversity and ecological flows. Springer, New York, New York, USA.

Falk, D.A., Allen, C.D., Parmenter, R., Swetnam, T., & Dils, C., 2011. Fire Regimes of Montane Grasslands of the Valles Caldera National Preserve, New Mexico. JFSP Research Project Reports. 83.

Finney, M.A., 2006. An overview of FlamMap fire modeling capabilities. In 'Fuels management—how to measure success: conference proceedings', 28–30 March, Portland, OR. (Comp PL Andrews, BW Butler), USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station Proceedings RMRS-P- 41, pp. 213–220.

Finney, M.A., 2005. The challenge of quantitative risk analysis for wildland fire. Forest Ecology and Management. 211: 97–108.

Finney, M.A., 2002. Fire growth using minimum travel time methods. Canadian Journal of Forest Research. 32(8): 1420–1424.

Fisher, R.F., Jenkins, M.J., Fisher, J.W., 1987. Fire and the prairie-forest mosaic of Devil's Tower National Monument. The American Midland Naturalist. 117: 250-257.

González-Olabarria, J.R., & Pukkala, T., 2011. Integrating fire risk considerations in landscape-level forest planning. Forest Ecology and Management. 261: 278–287.

Harvey, J.E., Smith, D.J., & Veblen, T.T., 2017. Mixed-severity fire history at a forest-grassland ecotone in west central British Columbia, Canada. Ecological Applications. 27 (6): 1-15.

Jahdi, R., Salis, M., Alcasena, F., Arabi, M., Arca, B., Duce, P., 2020. Evaluating landscape-scale wildfire exposure in northwestern Iran. Natural Hazards. 101: 911-932.

Jahdi, R., Salis, M., Darvishsefat, A.A., Alcasena, F., Mostafavi, M.A., Etemad, V., Munoz Lozano, O., & Spano, D., 2016. Evaluating fire modeling systems in recent wildfires of the Golestan National Park, Iran. Forestry: An International Journal of Forest Research. 89: 136-149.

Keane, R.E., Cary, G.J., Parsons, R., 2003. Using simulation to map fire regimes: An evaluation of approaches, strategies, and limitations. International Journal of Wildland Fire. 12: 309–322.

Kitzberger, T., 2012. Ecotones as complex arenas of disturbance, climate, and human impacts: the trans-Andean forest-steppe ecotone of northern Patagonia. Pages 59-88 in: R.W. Myster, editor. Ecotones between forest and grassland. Springer, New York, New York, USA.

Kotze, D.J., & Samways, M.J., 2001. No general edge effects for invertebrates at Afromontane forest/grassland ecotones. Biodiversity & Conservation. 10: 443–466.

League, K., & Veblen, T., 2006. Climatic variability and episodic Pinus ponderosa establishment along the forest-grassland ecotones of Colorado. Forest Ecology and Management. 228(1): 98-107.

Leylian, M.R., Amirkhani, A., Ansari, M., & Bemanian, M.R., 2010. Investigating the Perceptions of Residents in Golestan National Park, Iran. Asian Social Science. 6 (9): 64.72.

McPherson, G.R., 1995. The role of fire in the desert grasslands. Pages 130-151 in: M.P. McClaran, and T.R. Van Devender, editors. The desert grassland. University of Arizona Press, Tucson, Arizona, USA.

Miller, C., & Ager, A.A., 2013. A review of recent advances in risk analysis for wildfire management. International Journal of Wildland Fire. 22: 1–14.

Miller, C., Parisien, M.A., Ager, A.A., & Finney, M.A., 2008. Evaluating spatially explicit burn probabilities for strategic fire management planning. Transactions on Ecology and the Environment. 19: 245-252.

Moritz, M.A., Hessburg, P.F., & Povak, N.A., 2011. Native fire regimes and landscape resilience. Pages 51-88 in: D. McKenzie, C. Miller, and D.A. Falk, editors. The landscape ecology of fire. Springer, New York, New York, USA.

Myster, R.W., editor. 2012. Ecotones between forest and grassland. Springer, New York, New York, USA.

Noonan-Wright, E.K., Opperman, T.S., Finney, M.A., Zimmerman, G.T., Seli, R.C., Elenz, L.M., Calkin, D.E., & Fiedler, J.R., 2011. Developing the US wildland fire decision support system (WFDSS). Journal of Combustion. 2011: 11–40.

Parks, S.A., Parisien, M.A., & Miller, C., 2012. Spatial bottom-up controls on fire likelihood vary across western North America. Ecosphere. 3(1): 1-20.

Parisien, M.A., Dawe, D.A, Miller, C., Stockdale, C.A., & Armitage, O.B., 2019. Applications of simulation-based burn probability modelling: a review. International Journal of Wildland Fire. 28: 913–926.

Peterson, D.W., & Reich, P.B., 2008. Fire frequency and tree canopy structure influence plant species diversity in a forest-grassland ecotone. Plant Ecology. 194(1): 5-16.

Salis, M., Ager, A.A., Arca, B., Finney, M.A., Bacciu, V., Duce, P., & Spano, D., 2013. Assessing exposure of human and ecological values to wildfire in Sardinia, Italy. International Journal of Wildland Fire. 22 (4): 549–565.

Salis, M., Ager, A.A., Finney, M.A., Arca, B., & Spano, D., 2014. Analyzing spatiotemporal changes in wildfire regime and exposure across a Mediterranean fire-prone area. Natural Hazards. 71(3): 1389–1418.

Schoennagel, T., Smithwick, E.A., & Turner, M.G., 2008. Landscape heterogeneity following large fires: insights from Yellowstone National Park, USA. International Journal of Wildland Fire. 17: 742-753.

Sirolli, H., & Kalesnik, F., 2010. Effects of fire on a forest-grassland ecotone in De La Plata River, Argentina. Plant Ecology. 212 (4): 689-700.

Thompson, M.P., Calkin, D.E., Gilbertson-Day, J.W., Ager, A.A., 2011. Advancing effects analysis for integrated, large scale wildfire risk assessment. Environmental Monitoring and Assessment. 179 (1–4): 217–239.

Thompson, M.P., Scott, J., Langowski, P.G., Gilbertson-Day, J.W., Haas, J.R., & Bowne, E.M., 2013. Assessing watershed-wildfire risks on national forest system lands in the rocky mountain region of the United States. Water. 5(3): 945–971.